Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 37, No. 3, Jul-Agu 2023, p. 383-396

The Effect of Raindrop Impact on Runoff and Soil Loss from Rills under Different Rainfall Intensities

A.R. Vaezi[1]*, R. Bigdeli[2]

Received: 12-09-2020 Revised: 19-01-2022 Accepted: 01-07-2023 Available Online: 03-07-2023	**How to cite this article:** Vaezi, A.R., & Bigdeli, R. (2023). The effect of raindrop impact on runoff and soil loss from rills under different rainfall intensities. *Journal of Water and Soil*, *37*(3), 383-396. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2023.15038.0

Introduction

Rill erosion is one of the main factors of soil degradation, especially in rainfed lands in semi-arid regions. These soils have relatively lower organic matter content with weakly-aggregated units, which increases their susceptibility to water erosion processes. Conventional tillage systems are adversely affect on soil structure and surface soil cover in rainfed lands. Raindrop energy and flow shear stress are the main erosive factors in the slope lands. The raindrop impact destroys soil structure and changes it to erodible unites; micro-aggregates and single particles, and so makes them to more detachment. A few studies have been done on the role of raindrop impact to soil erosion by water. Nevertheless, there is no sufficient information on the effect of raindrop impact on soil loss in the rills particularly in semi-arid regions. Therefore, this study was conducted to investigate the role of raindrop impact on soil loss from rills in various soil textures under different rainfall intensities.

Materials and Methods

A laboratory experiment was performed on two soil textures (clay loam and sandy loam) under four rainfall intensities (30, 50, 72 and 83 $mm.h^{-1}$) in two rainfall conditions (under raindrops impact and without raindrops impact). Soil samples (0-30 cm) were taken from a semi-arid region in Zanjan province in 2020. The experiments were set up in an erosion flume with 100 cm long and 60 cm width and 15 cm depth which were exposed to simulated rainfalls for 30 min duration. Runoff and soil loss were measured at three rills under slope gradient 10% in the two rainfall conditions for each rainfall intensity. Soil loss from rills was determined as the mass of sediment collected from rill outlet per rill surface area ($g.m^{-2}$). Under raindrop impact, the soil was exposed directly to raindrop impact and under without raindrop impact, a metal mesh sheet was used to eliminate raindrops impact to soil surface. The role of raindrops impact to runoff and soil loss was computed from the difference of runoff and soil loss under raindrops impact and without raindrops impacts. A t-test was used to assess the role of raindrops impact between the two rainfall conditions for the soils and rainfall intensities.

Results and Discussion

Results indicated that runoff production and soil loss were significantly affected by the soil texture and rainfall intensity. Runoff and soil loss under raindrops impact increased in the soils with increasing rainfall intensity. Clay loam showed more runoff production and soil loss than sandy loam which was associated to lower aggregate stability and hydraulic conductivity. Runoff and soil loss in the two soils and four rainfall intensities were significantly affected by raindrops impact. Runoff production and soil loss except to 72 $mm.h^{-1}$ rainfall intensity were very higher under raindrop impact than without raindrop impact. It seems under 72 $mm.h^{-1}$ rainfall intensity, raindrops impact varied the rill's morphology and prevent more runoff production. Runoff production in clay loam and sandy loam under raindrop impact were increased by 44 and 36 percent, respectively ($p< 0.01$). Soil loss

1 and 2- Professor and Former M.Sc. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: vaezi.alireza@znu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jsw.2023.15038.0

resulted by raindrop impact in clay loam and sandy loam increased by 53 and 62 percent, respectively ($p< 0.01$). Raindrops impact had more importance in soil loss rather than runoff production. This result is related to the role of raindrops impact in destroying aggregates and producing more erodible soil particles and closing soil macrospores and declining water infiltration. The role of raindrop impact in runoff production and soil loss varied among the rainfall intensities. A slight reduction in the role of raindrop impact in runoff and soil loss was occurred with increasing rainfall intensity, especially in sandy loam.

Conclusion

The role of raindrop impact in runoff production and soil loss was significantly affected by soil type and rainfall intensity. Raindrops impact has more important in runoff and soil loss in the soils having higher aggregate stability and more hydraulic conductivity. The role of raindrop impact in runoff and soil loss in these soils declines with increasing rainfall intensity. In general, maintain soil surface cover is essential to control raindrops impact and decrease runoff and soil loss in semi-arid areas. The importance of soil surface cover is most obvious under different rainfalls in weakly-aggregated soils which are dominant in many slope lands. Also, soil surface cover has important role in controlling runoff and soil loss under heavy rainfalls in soils with more water-stable aggregates. Prevention from intensive tillage and using conservation tillage systems such as minimum tillage are effective strategies in controlling raindrop impact in rainfed lands in semi-arid regions.

Keywords: Aggregate resistance, Rainfall intensity, Semi-arid region, Soil texture, Surface cover

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۲، ص.۳۹۶-۳۸۳

تأثیر ضربه قطرات باران بر تولید رواناب و هدررفت خاک از شیارهای شخم تحت شدت‌های مختلف باران

علی رضا واعظی[1]*- رعنا بیگدلی[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰

چکیده

ضربه قطرات باران یکی از عوامل مؤثر بر تخریب ساختمان خاک و فرسایش آبی است. اطلاعات کافی در مورد نقش این عامل در تولید رواناب و هدررفت خاک از شیارها بەویژه در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک موجود نیست. این پژوهش با هدف بررسی اثر ضربه قطرات باران بر تولید رواناب و هدررفت خاک از شیارها تحت شدت‌های مختلف باران در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک در استان زنجان انجام شد. برای این منظور آزمایش در دو خاک با بافت مختلف (لوم‌رسی و لوم‌شنی) تحت چهار شدت بارندگی (۳۰، ۵۰، ۷۲ و ۸۳ میلی‌متر بر ساعت) در دو حالت بارندگی (تحت ضربه قطرات و حذف اثر ضربه قطرات باران) در فلوم فرسایشی تحت شیب ۱۰ درصد انجام گرفت. نتایج نشان داد که تولید رواناب تحت تأثیر ضربه قطرات باران در خاک لوم‌رسی و لوم‌شنی به‌ترتیب ۴۴ و ۳۶ درصد افزایش یافت ($p<0/01$) و هدررفت خاک نیز در این دو خاک به‌ترتیب ۵۲ و ۶۲ درصد بیشتر از حالت بدون ضربه قطرات بود ($p<0/01$). تولید رواناب و هدررفت خاک بین دو حالت باران به شدت باران وابسته بود؛ به‌طوری‌که با افزایش شدت باران، نقش ضربه قطرات به ویژه در خاک لوم‌شنی تغییرات زیادی یافت. با افزایش شدت باران هدررفت خاک نسبت به تولید رواناب دچار کاهش بیشتری شد که این موضوع نشان‌دهنده مقاومت اندک خاکدانه‌ها به اثر ضربه قطرات باران در شدت‌های بارندگی بالا است. با توجه به ساختمان ناپایدار خاک‌های مناطق نیمه‌خشک، حفظ پوشش سطحی برای جلوگیری از تأثیر ضربه قطرات باران بر تولید رواناب و هدررفت خاک ضروری است.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک، پوشش سطح، شدت باران، مقاومت خاکدانه، منطقه نیمه‌خشک

مقدمه

فرسایش خاک تهدیدی جدی برای محیط زیست و امنیت کشاورزی است (Wu *et al.*, 2018). فرسایش شیاری عامل مهم هدررفت خاک و آب در مراتع و زمین‌های زراعی شیب‌دار در بسیاری از نقاط جهان است (Kimaro *et al.*, 2008). فرسایش شیاری، منبع و فرآیند عمده تولید رسوب در دامنه‌های شیب‌دار به ویژه تحت بارندگی‌های شدید در این مناطق است (Vaezi and Vatani., 2014) به‌طوری‌که بیش از ۸۰ درصد فرسایش در اراضی شیب‌دار کشاورزی را شامل می‌شود (Qin *et al.*, 2019). این فرسایش در اثر جریان متمرکز در دامنه‌ها به وجود آمده و پس از سالها، آبراهه‌ای کم عمق در امتداد شیب به وجود می‌آید. فرسایش شیاری عبارت از جدا شدن و انتقال رسوب به وسیله جریان متمرکز آب در آبراهه‌ای باریک و فرسایش‌پذیر است (Chen *et al.*, 2017). این فرسایش مرحله آغازین فرسایش

۱ و ۲- به‌ترتیب استاد و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: vaezi.alireza@znu.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.2023.15038.0

آبکندی بوده و یکی از اصلی‌ترین اشکال فرسایش خاک در دامنه‌ها است (Wirtz *et al*., 2012).

فرسایش شیاری دربرگیرنده سه فرآیند: جدا شدن خاکدانه‌ها، انتقال و رسوبگذاری است (He *et al*., 2014). توسعه شیارها تأثیر مهمی در وقوع رواناب در دامنه‌ها و تغییر در مورفولوژی زمین دارد (Qin *et al*., 2018). با ظهور کانال‌های فرسایشی بر روی شیب، تولید رواناب و انتقال ذرات خاک بیشتر شده، فرسایش شیاری گسترش می‌یابد (Huo *et al*., 2011). با تشکیل اولین شیار بر روی شیب، فرسایش خاک به سرعت افزایش یافته و باعث تغییر مداوم ریخت‌شناسی شیب می‌گردد (Momm *et al*., 2018). آستانه تشکیل شیار در واقع زمانی است که تنش برشی بر مقاومت خاک غلبه می‌کند و این متأثر از میزان پوشش سنگریزه‌ای سطح خاک و برخی ویژگی‌های رواناب می‌باشد (Tailong *et al*., 2010).

تشکیل و تکامل شیارها فرآیندهایی پیچیده هستند که تحت تأثیر عوامل بسیاری از جمله عوامل داخلی و خارجی قرار دارند (Qin *et al*., 2018؛ Zhao *et al*., 2018). عوامل گوناگونی مانند بارش، رواناب، توپوگرافی و سیستم کشت و کار تأثیر مهمی در توسعه شیار و تولید رسوب دارند. البته عوامل اصلی و قابل کنترل در فرسایش شیاری ترکیبی از رواناب و خاک است و دیگر عوامل با تأثیر غیرمستقیم سبب افزایش و کاهش عوامل اصلی می‌شوند (Wirtz *et al*., 2012). خاک از جنبه های مختلفی از جمله: مقاومت خاک ، حساسیت به سله‌بندی، ظرفیت نفوذ، محتوای آب خاک، اثرات پیچیده‌ای بر روی فرسایش شیاری دارد. عمدتاً حساسیت خاک به فرسایش به عنوان فرسایش پذیری خاک تعریف شده است که مربوط به طیف وسیعی از خصوصیات خاک از جمله ویژگی های فیزیکی مانند ساختمان و بافت و ویژگی‌های شیمیایی مانند درصد ماده آلی و سدیم تبادلی می‌باشد (Vrieling, 2006). ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل پایداری خاکدانه ها، چگالی ظاهری، ترکیب ذرات خاک، محتوای آب خاک از طریق تغییر در ظرفیت نفوذپذیری خاک و مقاومت برشی خاک بر روی فرسایش شیاری تأثیر می گذارند (Li *et al*., 2010).

ضربه قطره باران عامل مهمی در فرسایش خاک است، به طوری‌که نه تنها در جداسازی ذرات خاک، بلکه در افزایش رسوب نیز حائز اهمیت است (Zhang and Wang, 2017). پاشش توسط قطرات باران به عنوان مهمترین عامل جدا شدن ذرات خاک است (Fu *et al*., 2017, Lu *et al*., 2016). هنگامی که قطرات باران بر سطح خاک اثر می گذارند، انرژی آنها صرف غلبه بر پیوند بین ذرات مصرف می‌شود. جدا شدن ذرات توسط ضربه قطره باران به عنوان فرآیند آغاز کننده فرسایش آبی شناخته می‌شود (Ma *et al*., 2014). فرسایش پاشمانی از جمله اشکال فرسایش آبی است که به شدت تحت تأثیر ضربه قطرات باران است (Fernández-Raga *et al*., 2010). شدت باران نقش مهمی در بروز اشکال فرسایش آبی دارد. برخی از پژوهشگران دریافتند که فرسایش شیاری با افزایش شدت باران افزایش می‌یابد (Berger *et al*., 2010). باافزایش شدت باران، اثر ضربه قطرات باران افزایش یافته، سبب فشردگی خاک، کاهش نفوذ و افزایش تولید رواناب می‌گردد (Lu *et al*., 2016).

ضربه قطرات باران در کنار تنش برشی رواناب، دو عامل مهم فرسایش خاک در اراضی شیبدار هستند (Meshesha *et al*., 2016). توانایی باران در فرسایش خاک که به عنوان فرسایندگی باران بیان می‌شود، دربرگیرنده نقش ضربه قطرات و نیروی رواناب است (Angulo-Martínez *et al*., 2016). ضربه مکانیکی قطرات باران عامی مهم در تخریب خاکدانه‌ها، تشکیل سله و کاهش نفوذپذیری خاک است (Francos *et al*., 2016). این نقش از باران تأثیر زیادی در افزایش تولید رواناب و فرسایش خاک دارد. به عبارت دیگر، تولید رواناب به تخریب فیزیکی خاک در اثر ضربه قطرات باران نیز بستگی دارد (Vaezi *et al*., 2017). مطالعات اندکی در مورد تأثیر ضربه قطرات باران بر رواناب و فرسایش صورت گرفته است. بوزلینک و همکاران (Beuselinck *et al*., 2002) به بررسی تأثیر قطرات باران در تجمع رسوب توسط جریان سطحی در خاک‌های مختلف پرداخت و دریافتند که قطرات باران سرعت جریان را مهار می کند و تأثیر مثبتی در تحویل رسوب دارد. آن و همکاران (An *et al*., 2012) با بررسی اثر ضربه قطرات باران بر فرآیندهای فرسایشی در خاک شنی نشان دادند که هدررفت خاک ناشی از ضربه قطرات باران بخش زیادی از عملکرد رسوب را شامل می‌شود. موسونی و همکاران (Moussouni *et al*., 2014) با بررسی انرژی جنبشی باران بر فرسایش‌پذیری خاک مزرعه نشان دادند که با افزایش شدت باران انرژی جنبشی قطرات باران افزایش یافته و موجب فرسایش بیشتر خاک می‌شود. واعظی و همکاران (Vaezi *et al*., 2017) با بررسی سهم ضربه قطرات باران در تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و هدررفت خاک در خاک لوم شنی در منطقه نیمه‌خشک اعلام کردند سهم قطرات باران در فرسایش سطحی با افزایش شدت بارندگی کاهش می‌یابد.

فرسایش شیاری به‌عنوان آغازین مرحله فرسایش درون‌آبراهه‌ای در دامنه‌ها به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک است (Foroumadi and Vaezi, 2017). تشکیل و گسترش شیار پدیده‌ای مهم است که موجب تخریب شدید خاک می‌شود (Shen *et al*., 2019). در مطالعات بسیاری به فرآیندهای مؤثر بر فرسایش شیاری (Wirtz *et al*., 2012)، عوامل مؤثر بر تشکیل شیار (Wei *et al*., 2007) و گسترش شیار (He *et al*., 2016) پرداخته‌اند. با این‌حال، مطالعات در مورد روند جدایش ذرات خاک توسط قطرات باران (Choo *et al*., 2018)، در خاک‌های مختلف محدود است. کشتزارهای دیم واقع در اراضی شیب‌دار تحت انواع فرسایش آبی هستند و به دلیل شخم موازی شیب، فرسایش شیاری نقشی مهم در هدررفت آب و خاک در نوارهای کشت دارد (Vaezi and Heidari, 2019). مطالعات اندکی در مورد نقش قطرات باران در

هدررفت آب و خاک در چنین نوارهای کشت انجام گرفته است. از این رو، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر ضربه قطرات باران بر رواناب و فرسایش خاک در شیارها در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

انتخاب خاک‌های مورد بررسی

برای انجام این پژوهش، خاک‌های مختلف از زمین‌های دیم استان زنجان نمونه‌برداری و تجزیه شدند و در آخر دو خاک با بافت مختلف (لوم‌شنی و لوم‌رسی) به عنوان خاک غالب منطقه نیمه‌خشک انتخاب شدند. خاک‌های مذکور به عنوان خاک‌های غالب در کشتزارهای دیم منطقه مورد بررسی هستند (Vaezi *et al.*, 2014). حدود ۸۰۰ کیلوگرم از هر خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری جمع‌آوری و به آزمایشگاه فرسایش خاک دانشگاه زنجان منتقل شدند. خاک‌ها برای حفظ ساختمان خاک و تطابق با شرایط مزرعه‌ای، از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شدند (Jin *et al.*, 2009).

اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک

برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها، نمونه‌ای از خاک‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند. توزیع اندازه ذرات اولیه خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، چگالی ظاهری با استفاده از روش سیلندر فلزی (Blake and Hartge, 1986)، پایداری خاکدانه در خاکدانه‌هایی با قطر ۵/۶ تا ۸ میلی‌متر به روش الک تر (Yoder, 1936) به مدت یک دقیقه (Vaezi *et al.*, 2017)، ماده آلی به روش والکی و بلک (Walkley and Black, 1934)، و هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت (Mc Kenzie *et al.*, 2002) اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری رواناب و هدررفت خاک

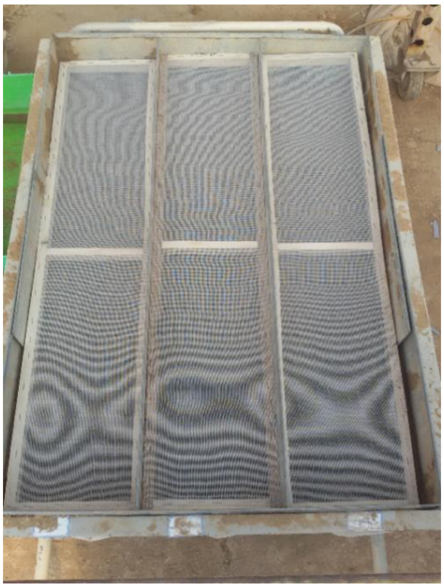
مطالعه روند فرسایش از شیارها و انتقال ذرات از شیار در دو حالت بررسی شدند: ۱) تحت ضربه قطرات باران و ۲) بدون ضربه قطرات باران. برای این کار از فلومی به طول ۱۰۰ سانتی‌متر، به عرض ۶۰ سانتی‌متر و عمق ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. آزمایش‌ها تحت شیب ۱۰ درصد بر اساس شیب غالب دامنه‌های تحت شخم در منطقه تنظیم شدند. برای انجام آزمایش در سه تکرار، فلوم فرسایشی به سه بخش با عرض ۲۰ سانتی‌متر در امتداد فلوم تقسیم شد. در هر آزمایش، نمونه های خاک مورد نظر به درون سه بخش از فلوم منتقل شده و در هر بخش، شیاری با عمق ۷ سانتی‌متر مطابق با شیارهای تحت کشت دیم ایجاد شد. خاک‌ها برای تطبیق بیشتر با شرایط مزرعه‌ای، پیش از اعمال باران‌های شبیه‌سازی شده اشباع شدند و پس از گذشت ۲۴ تا ۴۸ ساعت و توقف خروج آب ثقلی، که رطوبت خاک به حد بالاترین ظرفیت نگهداری آب خاک رسید، تحت باران قرار گرفتند. برای اعمال بارندگی، از دستگاه شبیه ساز باران به ابعاد ۱/۵ متر طول و ۱ متر عرض به ارتفاع ۳ متر استفاده شد. چهار شدت بارندگی (۳۰، ۵۰، ۷۲ و ۸۳ میلی‌متر بر ساعت) در دستگاه شبیه‌ساز باران تنظیم شد. فراوانی وقوع شدت‌های باران مذکور به ترتیب ۳۱، ۹، ۳ و ۲ درصد در منطقه مطالعاتی هست (Vaezi and Besharat, 2015). باران‌های شدید (بیشتر از ۷۰ میلی متر بر ساعت)، با وجود فراوانی اندکی سهم زیادی از فرسایش آبی در منطقه را دارند. در هر بخش از آزمایش، خاک‌ها به‌صورت جداگانه، به مدت ۳۰ دقیقه تحت یکی از شدت‌های بارندگی قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری تولید رواناب و هدررفت خاک در حالت بدون ضربه، توری‌های فلزی با قاب چوبی برای هر بخش از فلوم ساخته و در آزمایش‌های حذف اثر ضربه قطرات باران استفاده شدند (شکل ۱). در فاصله‌های زمانی ۵ دقیقه نمونه‌های رواناب و رسوب جمع‌آوری شدند.

پس از جداسازی رواناب از رسوب به وسیله کاغذ صافی، ارتفاع رواناب در هر بارندگی به دست آمد و جرم رسوب، پس از خشک شدن در آون (دمای ۱۰۵ درجه، ۲۴ ساعت) برای هر نمونه تعیین شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا داده‌ها از نظر توزیع نرمال بودن با استفاده از آماره‌های چولگی و کشیدگی مورد بررسی قرار گرفتند. برای تعیین سهم ضربه قطرات باران در تولید رواناب و هدررفت خاک، مقدار این دو متغیر در دو حالت مذکور (تحت ضربه قطرات و بدون آنها) مقایسه شد. برای بررسی تفاوت تأثیر ضربه قطره باران از نظر تولید رواناب و هدررفت از شیارها در خاک‌ها در هر یک از شدت‌های مختلف باران از آزمون تی جفتی (t-test) استفاده شد. برای مقایسه بین هر یک از شدت‌های باران از نظر تولید رواناب و فرسایش بین‌شیاری از روش تجزیه‌واریانس استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی به دست آمد. برای این منظور از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۴ بهره گرفته شد. همچنین برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۶ استفاده شد.


(a) (الف)


(b) (ب)

شکل ۱- فلوم آزمایشی در دو شرایط: تحت ضربه قطرات (الف) و بدون ضربه قطرات باران (ب)

Figure 1- Experimental flume in two conditions: with raindrop impact (a) and without raindrop impact (b)

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک‌های مورد بررسی

Table 1- Physicochemical properties of the study soils

نوع خاک Soil type	ویژگی‌های خاک Soil properties						
	شن Sand (٪)	سیلت Silt (٪)	رس Clay (٪)	ماده آلی OM (٪)	هدایت هیدرولیکی اشباع K_s ($cm.h^{-1}$)	چگالی ظاهری BD ($g.cm^{-3}$)	پایداری خاکدانه‌ها MWD_{wet} (mm)
لوم‌رسی (Clay loam)	26.88	35.60	37.52	0.44	5.34	1.17	0.52
لوم‌شنی (Sandy loam)	67.17	25.32	7.51	0.81	13.86	1.40	0.92

نتایج و بحث

ویژگی خاک‌های مورد بررسی

برخی ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده‌اند. محتوای ماده آلی در خاک‌های مورد بررسی اندک (کمتر از ۱ درصد) است؛ به‌طوری‌که این مقدار در خاک لوم‌رسی ۰/۴۴ درصد و در خاک لوم‌شنی ۰/۸۱ درصد می‌باشد. عدم حفظ بقایای گیاهی و مخلوط کردن با خاک دلیل اصلی کمبود ماده آلی در خاک‌های دیم مناطق نیمه‌خشک است (Vaezi *et al.*, 2017). هر دو خاک، به‌ویژه خاک لوم‌رسی، پایداری ساختمانی ضعیفی در برابر آب دارند. پایداری اندک خاکدانه‌ها، ویژگی غالب خاک‌های مناطق نیمه‌خشک است که حساسیت آنها را در برابر تخریب ناشی از قطرات باران بیشتر می‌کند (Akbari and Vaezi, 2015). چگالی ظاهری خاک لوم‌رسی به دلیل بافت ریز و برخورداری از منافذ ریز زیاد نسبت به خاک لوم‌شنی کمتر است. با این‌حال، نفوذپذیری خاک لوم‌شنی (۱۳/۸۶ $cm.h^{-1}$) به علت فراوانی زیاد منافذ درشت نسبت به خاک لوم‌رسی (۵/۳۴ $cm.h^{-1}$) بیشتر است.

تغییرات رواناب و هدررفت خاک‌ها در شدت‌های باران

آزمون t جفتی برای هر یک از شدت‌های باران به‌طور جداگانه انجام گرفت تا تفاوت آماری تولید رواناب و هدررفت خاک بین دو حالت بارندگی (تحت ضربه قطرات و حذف ضربه قطرات باران) را

نشان دهد (جدول ۲). نتایج نشان داد که نقش ضربه قطرات باران در تولید رواناب و هدررفت خاک در خاک لوم‌شنی معنی‌دار بود (p<۰/۰۱). در خاک لوم‌رسی، تفاوت در دو حالت بارندگی از نظر تولید رواناب تنها در شدت‌های پایین (۳۰ و ۵۰ میلی‌متر بر ساعت) معنی‌دار بود و از نظر هدررفت خاک در همه شدت‌های باران به جز در شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت معنی‌دار بود. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر پایداری ساختمان خاک در تولید رواناب و فرسایش از شیار است. گزارش‌ها نشان می‌دهد در خاک‌هایی که ساختمان بهتری دارند، نقش ضربه قطره باران در تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک و فرسایش اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (Vaezi *et al*., 2017).

بر اساس شکل ۲ با افزایش شدت باران، مقدار تولید رواناب و هدررفت خاک از شیار در دو حالت باران (تحت ضربه قطرات و حذف ضربه قطرات باران) افزایش یافت. این نتیجه به این دلیل بود که از یک‌سو افزایش شدت باران، افزایش تأمین آب در سطح خاک و در نتیجه کاهش شدید نفوذپذیری خاک و تولید رواناب بیشتر را به دنبال داشت (Foroumadi and Vaezi, 2018) و از سوی دیگر در حالت تحت ضربه قطرات باران، انرژی جنبشی قطرات عامل فروپاشی خاکدانه‌ها، تشکیل اندوده سطحی و در نتیجه کاهش تخلخل و نفوذپذیری خاک بود (Foroumadi and Vaezi, 2017). نکته دیگر آن که ضربه قطرات باران، درصد ذرات فرسایش‌پذیر در سطح خاک را افزایش می‌دهد. دو علت اخیر موجب شد تولید رواناب و هدررفت خاک با افزایش شدت باران به ویژه در شرایط ضربه قطرات باران افزایش شدیدی پیدا کند. افزایش هدررفت آب و خاک در باران‌های شدید موضوعی شناخته شده است؛ به طوری‌که کینل (Kinnel, 2003) گزارش کرد که بین هدررفت خاک و فرسایندگی باران رابطه نمایی وجود دارد و مدل‌های فرسایشی که مبتنی بر فرسایندگی باران و رواناب باشند، بهتر می‌توانند هدررفت خاک را تبیین نمایند. چنگ و همکاران (Cheng *et al*., 2008) و ظریف و همکاران (Zarif *et al*., 2009) نشان دادند که بین فرسایش شیاری و شدت باران غالباً رابطه معنی‌دار وجود دارد؛ به‌طوری که با افزایش شدت باران هدررفت خاک افزایش پیدا می‌کند. این موضوع از یک سو به دلیل نقش ضربه قطرات باران در تخریب خاکدانه‌ها و از سوی دیگر افزایش تولید رواناب است. همچنین هان و همکاران (Han *et al*., 2016) نشان دادند که با افزایش شدت بارندگی، انرژی جنبشی قطرات باران افزایش می‌یابد و این موضوع موجب تشکیل اندوده سطحی و کاهش تخلخل خاک شده و با کاهش نفوذپذیری خاک، ذرات بیشتری برای انتقال توسط جریان سطحی فراهم می‌شود.

جدول ۲- مقایسه تأثیر ضربه قطرات باران بر رواناب و هدررفت خاک در شدت‌های مختلف باران با استفاده از آزمون t جفتی [۱]

Table 2- Comparison of the effect of rainfall impact on runoff production and soil loss at different rainfall intensities using paired t-test

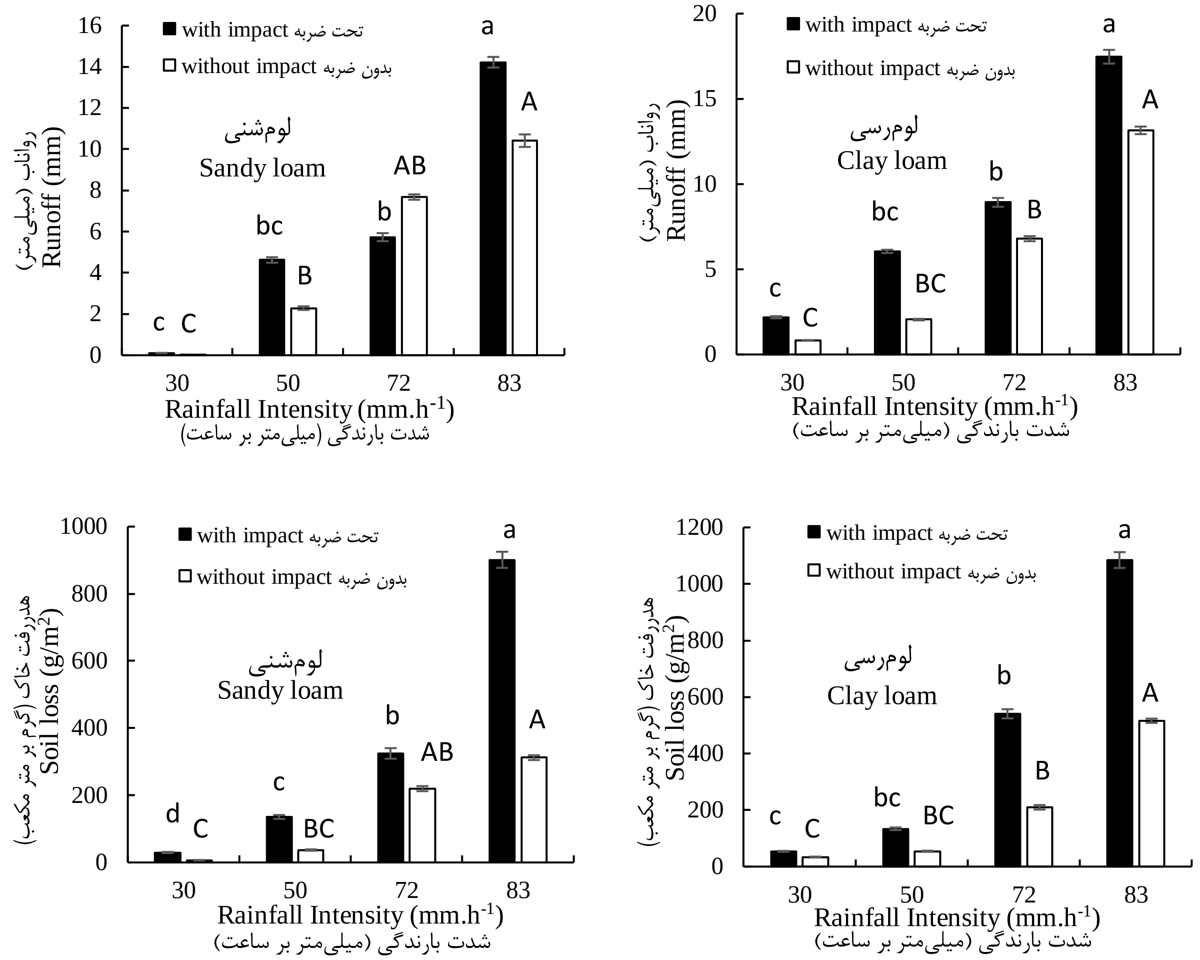
متغیر Variable	نوع خاک Soil texture	شدت باران Rainfall Intensity (mm/h) 30	50	72	83
رواناب Runoff (mm)	لوم‌رسی (Clay loam)	3.656**	7.915**	1.636 n.s	1.870 n.s
	لوم‌شنی (Sandy loam)	3.265**	3.828**	2.277*	2.370*
هدررفت خاک Soil Loss ($g.m^{-2}$)	لوم‌رسی (Clay loam)	1.810 n.s	3.045**	3.346**	3.586**
	لوم‌شنی (Sandy loam)	3.059**	4.283**	1.337 n.s	5.179**

[۱] برای هر شدت باران، آزمون جداگانه t جفتی انجام گرفته است و تفاوت‌ها در هر شدت باران، مستقل از شدت دیگر است

*، ** و n.s به ترتیب معنی‌داری در سطح ۹۹/۹۹ درصد، ۹۹/۹۵ درصد و غیرمعنی‌دار

[1] The t-test was done separately for each rainfall intensity and difference between the two conditions for each rainfall intensity is dependent of other rainfall intensity.

*, ** and n.s were significant at the level of 99.99%, 99.95% and non-significant, respectively

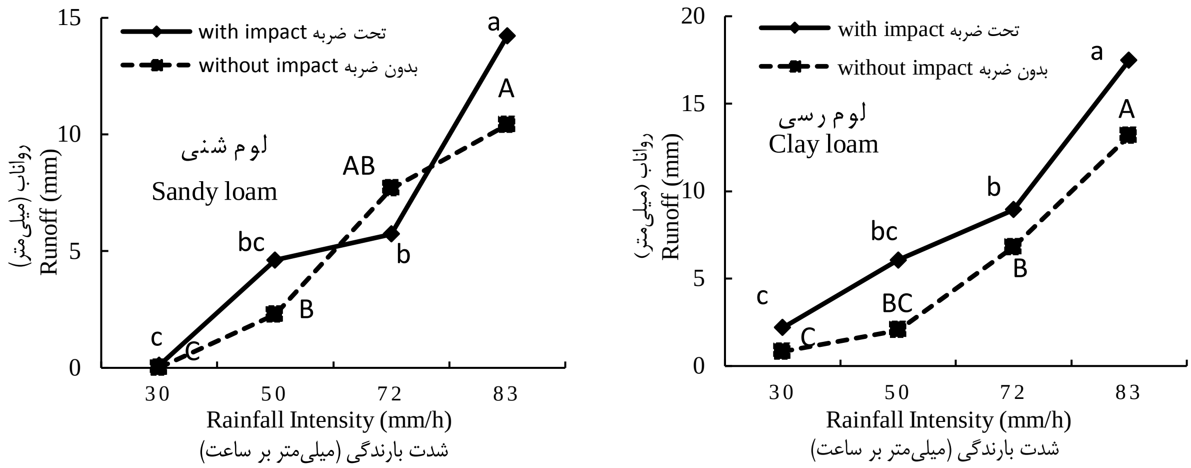


شکل ۲- مقایسه میانگین‌ها برای رواناب و هدررفت خاک در دو شرایط باران تحت شدت‌های مختلف باران

Figure 2- Means comparison for runoff and soil loss as affected by raindrop impact under different rainfall intensities

نقش ضربه قطرات باران در رواناب در شدت‌های باران

بررسی تولید رواناب در دو حالت باران در شدت‌های مختلف نشان داد که به جز در شدت باران ۷۲ میلی‌متر بر ساعت در خاک لوم‌شنی، مقدار رواناب خروجی در هر دو خاک در تمامی شدت‌ها در حالت تحت ضربه قطرات باران بیشتر از حالت بدون ضربه است (شکل ۳). مقدار رواناب تولیدی در هر دو خاک در شدت‌های پایین مقدار کمتری بوده و با افزایش شدت بارندگی، مقدار رواناب افزایش یافت که ناشی از افزایش انرژی جنبشی قطرات باران در شدت‌های بالاتر بود. با افزایش انرژی جنبشی باران، تخریب ساختمان خاک سطحی بیشتر شده، زمینه برای تشکیل اندوده سطحی و در نتیجه تولید رواناب فراهم می‌آید. لیو و همکاران (Lu *et al.*, 2016) اعلام کردند با افزایش شدت باران، اثر قطرات باران افزایش یافته و این موضوع، باعث تراکم بیشتر خاک سطحی شده و در نتیجه کاهش نفوذ و تولید بیشتر رواناب را به همراه دارد. همچنین حذف ضربه قطرات باران، از تولید واناب سطحی خاک جلوگیری کرده، نفوذ آب را افزایش می‌دهد. فرناندز راگا و همکاران (Fernández-Raga *et al.*, 2010) در پژوهشی که با هدف بررسی رابطه بین انرژی جنبشی قطرات باران و فرسایش در خاک لوم شنی در شمال مرکزی پرتقال انجام دادند نتیجه گرفتند که با افزایش قطر قطرات باران، سرعت حد و انرژی جنبشی قطرات باران افزیش می‌یابد و به دلیل نقش تخریبی قطرات باران، فرسایش پاشمانی به صورت خطی افزایش می‌یابد. تفاوت منحنی‌های رواناب خروجی تحت شدت‌های مختلف باران در دو حالت، اهمیت نقش ضربه قطره باران را آشکار می‌کند (شکل ۳). فرومدی و واعظی (Foroumadi and Vaezi, 2016) نشان دادند رابطه شدت باران و شدت تولید جریان معنی‌دار بود ($p<0.01$ و $R^2=0.98$)؛ به‌طوری‌که با افزایش شدت باران، شدت جریان افزایش یافت. در خاک لوم‌شنی تحت شدت باران ۷۲ میلی‌متر بر ساعت احتمالاً ضربه قطرات باران منجر به تغییر مورفولوژی شیار از نظر شکل مقطع عبور جریان شد و این موضوع کاهش تولید رواناب را در پی داشت.

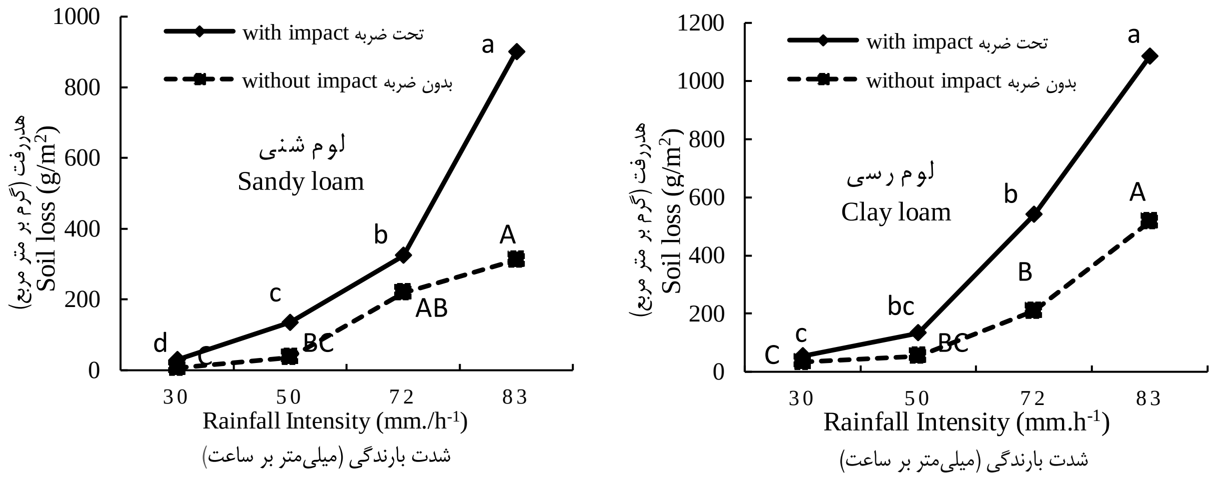


شکل ۳- مقایسه میانگین‌ها برای تولید رواناب در دو شرایط باران تحت شدت‌های مختلف باران

Figure 3- Means Comparison for runoff production at two rainfall conditions under different rainfall intensities

نقش ضــربه قطرات باران بر هدررفت خاک در شــدت‌های باران

مقدار هدررفت خاک از شیارها تحت ضربه قطرات باران در هر دو خاک بیشتر از حالت بدون ضربه قطرات باران بود (شکل ۴). ضربه قطرات باران از یک‌سو منجر به فرسایش پاشمانی می‌شود و از سوی دیگر با تخریب ساختمان خاک منجر به بسته شدن منافذ خاک و افزایش رواناب می‌شود. والتا و همکاران (Valette *et al*., 2006) نشان دادند قطرات باران پس از برخورد با سطح خاک، به دلیل ضربه مکانیکی خود باعث تخریب خاکدانه، ایجاد اندوده سطحی، کاهش نفوذپذیری خاک و در نتیجه افزایش فرسایش خاک می‌شود. در مطالعه‌ای آنگولو و همکاران (Angulo-Martínez *et al*., 2012) اعلام داشتند که میزان جدا شدن ذره به ویژگی‌های باران مثل انرژی جنبشی، شدت و مدت بارندگی و ویژگی‌های خاک بستگی دارد.



شکل ٤- مقایسه میانگین‌ها برای هدررفت خاک در دو شرایط باران تحت شدت‌های مختلف باران

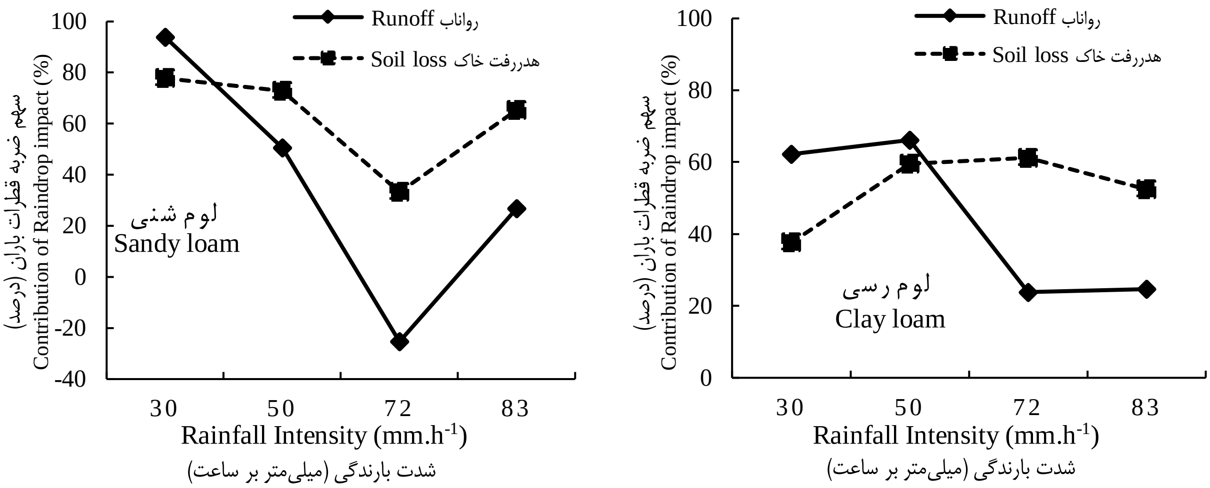
Figure 4- Means Comparison for soil loss at two rainfall conditions under different rainfall intensities

سهم ضربه قطرات باران بر رواناب و هدررفت خاک

سهم ضربه قطرات باران در تولید رواناب از مقایسه تولید رواناب در دو حالت: با ضربه قطرات باران و بدون ضربه قطرات باران به دست آمد. نتایج نشان داد بین شدت‌های مختلف باران، بیشترین سهم ضربه قطرات باران در تولید رواناب در شدت‌های پایین بارندگی بود (شکل ۵). با افزایش شدت بارندگی درصد سهم ضربه باران روند نزولی را طی می‌کند. در خاک لوم‌شنی، با افزایش شدت بارندگی نقش ضربه قطرات باران کاهش یافت. مقدار رواناب در شدت‌های پایین در این خاک‌ها تابع اثر قطرات باران در تخریب ساختمان خاک بود اما در شدت‌های بالاتر باران، تولید رواناب، به دلیل افزایش حجم باران ورودی به سطح خاک در هر دو حالت (تحت ضربه و بدون ضربه قطرات باران) زیاد بود.

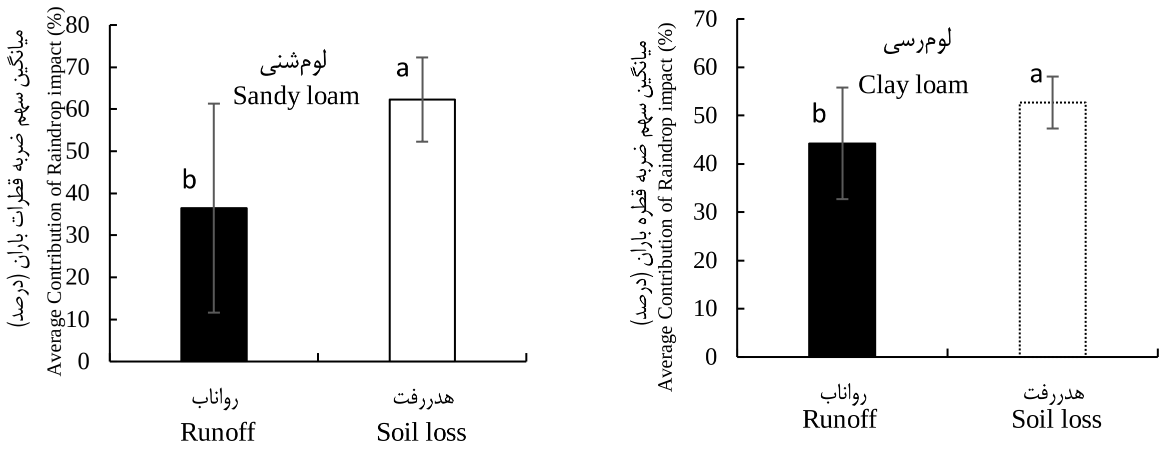
سهم ضربه قطرات در تولید رواناب در خاک لوم‌شنی در شدت ۷۲ میلی‌متر بر ساعت منفی بود که نشان می‌دهد ضربه قطرات باران نه تنها عاملی مؤثر در افزایش تولید رواناب در این خاک نبوده بلکه نقش بازدارنده نیز داشته است. همان‌طور که پیشتر بیان شد این نتیجه می توان به دلیل نقش ضربه قطرات در تغییر مورفولوژی شیار و در نتیجه کاهش رواناب باشد. سهم ضربه قطرات باران در تولید رواناب در خاک لوم‌رسی در همه شدت‌های بارندگی مقدار مثبتی بود. این موضوع، اثرگذاری غالب ضربه قطرات باران بر تولید رواناب را در این خاک نشان می‌دهد. همچنین فراوانی زیاد ذرات ریز و در نتیجه پایین بودن تخلخل درشت این خاک عاملی دیگر برای کاهش نفوذپذیری خاک و در نتیجه افزایش تولید رواناب در آن می‌تواند باشد (Vaezi and Vatani., 2015).

سهم ضربه قطرات باران در هدررفت خاک از شیار بیشتر از سهم آن در تولید رواناب بود. روند هدررفت خاک تحت اثر ضربه قطرات باران نامنظم بود و در شدت‌های مختلف باران با کاهش و افزایش مواجه بود. بررسی تغییرات کلی سهم ضربه قطرات در شدت‌های مختلف نشان دهنده روند افزایشی جزئی (غیرمعنی‌دار) در خاک لوم رسی و روند کاهشی جزئی (غیرمعنی‌دار) در خاک لوم شنی است (شکل ۵). دلیل این امر می‌تواند فراوانی ذرات فرسایش پذیر در شیار باشد که این مقدار وابسته به پایداری خاکدانه است. در خاک‌های فرسایش‌پذیرتر، به دلیل حساس بودن خاکدانه‌ها به فرسایش، قطرات باران توانایی بیشتری در تخریب و کنده شدن ذرات از شیار و انتقال آنها توسط رواناب دارند. این نتایج با گفته‌های گای و همکاران (Guy *et al.*, 1987) نیز موافق است که دریافت ۸۵ درصد کل عملکرد رسوب در اثر باران ناشی از ضربه قطرات باران است. همچنین آن و همکاران (An *et al.*, 2012) اعلام کردند اگر تفاوت در عملکرد رسوب بین تأثیر ضربه مستقیم باران و عدم ضربه باران در نظر گرفته شود، فرسایش توسط ضربه قطرات باران ۷۳/۷۵ تا ۹۶/۲۰ درصد از کل عملکرد رسوب را به خود اختصاص می‌دهد. خاک لوم رسی نسبت به خاک لوم شنی از محتوای ماده آلی کمتر، پایداری ساختمان ضعیف‌تر و هدایت هیدرولیکی اشباع پایین‌تر برخوردار بود. به این دلیل سهم ضربه قطرات در هدررفت خاک از آن کمتر از خاک لوم شنی شد. در خاک لوم‌شنی، نفوذپذیری بالای خاک از یک سو و مقاومت نسبتاً زیاد خاکدانه‌ها از سوی دیگر شرایطی را فراهم آورد که برای هدررفت خاک از آن نیازمند صرف بیشتر انرژی قطرات باران باشد. در این خاک بر خلاف لوم‌رسی، با افزایش شدت بارندگی سهم ضربه در هدررفت خاک از شیار کاهش یافت چرا که در شدت‌های بالای بارندگی افزایش حجم باران عامل مهمی در افزایش رواناب و هدررفت خاک بود.



شکل ۵- تفاوت سهم ضربه قطرات در رواناب و هدررفت خاک تحت شدت‌های مختلف باران

Figure 5- Difference between the role of raindrop impact in runoff and soil loss under different rainfall intensities



شکل ٦- میانگین سهم ضربه قطرات در تولید رواناب و هدررفت خاک تحت شدت‌های مختلف باران

Figure 6– Average contribution of raindrop impact in runoff production and soil loss under different rainfall intensities

مقایسه سهم ضربه قطرات باران بر رواناب و هدررفت خاک

بر اساس شکل ۶، سهم ضربه قطرات باران بر هدررفت خاک در هر دو خاک بیشتر از رواناب بود. میانگین سهم ضربه قطرات در شدت های باران از نظر رواناب در خاک لوم رسی ۴۴/۲ و در خاک لوم شنی ۳۶/۵ درصد بود. همچنین میانگین سهم ضربه قطرات در شدت‌های باران از نظر هدررفت خاک در خاک لوم رسی ۵۲/۷ درصد و در خاک لوم شنی ۶۲/۳ درصد بود. نقش ضربه قطرات باران در هدررفت خاک در خاک لوم‌رسی و لوم‌شنی به‌ترتیب ۸/۵ و ۲۵/۸ درصد بیشتر از نقش آن در تولید رواناب در آنها بود. این موضوع اهمیت حفظ پوشش گیاهی سطح خاک را برای مهار فرسایش آبی نشان می‌دهد (Francos *et al*., 2016). تولید رواناب در خاک لوم‌رسی به مقدار بیشتری نسبت به خاک لوم‌شنی متأثر از ضربه قطرات باران بود با این وجود نقش ضربه قطرات در هدررفت خاک از آن نسبتاً کمتر بود. ساختمان ضعیف در این خاک سبب شد تا ضربه قطرات باران به سهولت سبب جدایش خاکدانه‌ها شده و با انسداد منافذ خاک سبب افزایش تولید رواناب شوند. در برخی پژوهش‌ها به اهمیت ساختمان خاک از نظر مقاومت در برابر تخریب به وسیله قطرات باران اشاره شده است. روحی‌پور و همکاران (Rouhipour *et al*., 2004) در پژوهش خود، چهار نمونه خاک را تحت چهار شدت بارندگی و پنج شیب متفاوت بررسی کرده و نشان دادند که با افزایش درصد خاکدانه‌های پایدار، تخریب خاک توسط ضربه قطرات باران کاهش یافته و مقاومت خاک به فرسایش افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که شدت باران عاملی مهم در تولید رواناب و هدررفت خاک از شیارها در خاک‌های مورد بررسی در ناحیه نیمه خشک است. مقدار تولید رواناب در خاک لوم رسی و لوم شنی تحت تأثیر ضربه قطرات باران به‌ترتیب ۴۴ و ۳۶ درصد افزایش یافت و مقدار هدررفت خاک نیز به‌ترتیب ۵۳ و ۶۲ درصد بیشتر شد. این موضوع اهمیت ضربه قطرات باران را در تشدید رواناب و هدررفت خاک نشان می‌دهد. با توجه به پایداری بیش‌تر خاکدانه‌ها در خاک لوم‌شنی، نقش ضربه قطرات در هدررفت خاک در آن بارزتر بود. سهم ضربه قطرات باران بر رواناب و هدررفت خاک تحت تأثیر مقدار شدت باران قرار گرفت. به نظر می‌رسد با افزایش شدت باران، سهم قطرات باران در هدررفت خاک نسبت به رواناب دچار کاهش بیشتری می شود. این موضوع نشان دهنده مقاومت اندک خاکدانه‌ها در برابر تخریب قطرات باران در شدت های بالای بارندگی است. به طور کلی این پژوهش نشان داد که تأثیر ضربه قطرات باران در رواناب و هدررفت خاک به دو عامل نوع خاک (بافت خاک و ویژگی‌های ساختمانی) و شدت باران وابسته است. در خاک‌های با ساختمان نسبتاً پایدارتر و نیز در باران‌های با شدت پایین، سهم ضربه قطرات در رواناب و هدررفت خاک بسیار آشکارتر است. با توجه به ناپایداری نسبی ساختمان خاک‌ها در مناطق نیمه خشک جلوگیری از تأثیر مستقیم قطرات باران بر سطح خاک و تشدید تولید رواناب و هدررفت خاک ضروری است. اهمیت حفظ پوشش سطح خاک در باران‌های با شدت نسبتاً پایین دوچندان است.

منابع

1. Akbari, S., & Vaezi, A.R. (2015). Investigating aggregates stability against raindrops impact in some soils of a semi-arid region, North West of Zanjan. *Water and Soil Science*, *25*(2), 65-77. (In Persian)
2. An, J., Zheng, F., Lu, J., & Li, G. (2012). Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions. *Soil Science 177*(8), 517-526.
3. Angulo-Martínez, M., Beguería, S., & Kyselý, J. (2016). Use of disdrometer data to evaluate the relationship of rainfall kinetic energy and intensity (KE-I). *Science Total Environment 568,* 83–94. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.223
4. Angulo-Martínez, M., Beguería, S., Navas, A., & Machin, J. (2012). Splash erosion under natural rainfall on three soil types in NE Spain. *Geomorphology 175*, 38-44.
5. Berger, C., Schulze, M., Rieke-Zapp, D., & Schlunegger, F. (2010). Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity. *Earth Surface Processes and Landforms*, *35*(12), 1456-1467.
6. Beuselinck, L., Govers, G., Hairsine, P.B., Sander, G.C., & Breynaert, M. (2002). The influence of rainfall on sediment transport by overland flow over areas of net deposition. *Journal of Hydrology*, *257*, 145–163.
7. Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986). Particle density. Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods, *5*, 377-382.
8. Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, *54*(5), 464-465.
9. Chen, X.Y., Huang, Y.H., Zhao, Y., Mo, B., Mi, H.X., & Huang, C.H. (2017). Analytical method for determining rill detachment rate of purple soil as compared with that of loess soil. *Journal of Hydrology*, *549*, 236-243.
10. Cheng, Q., Ma, W., & Cai, Q. (2008). The relative importance of soil crust and slope angle in runoff and soil loss: a case study in the hilly areas of the Loess Plateau, north China, *GeoJournal*, *71*(2-3), 117-125.
11. Choo, H., Park, K.H., Won, J., & Burns, S.E. (2018). Resistance of coarse-grained particles against raindrop splash and its relation with splash erosion. *Soil and Tillage Research*, *184*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.still.2018.06.009
12. Fernández-Raga, M.R., Fraile, J., Keizer, M., Teijeiro, V.A., Castro, C., Palencia, C., & Marques, C. (2010). The kinetic energy of rain measured with an optical disdrometer: an application to splash erosion. *Atmospheric Research, 96*(2): 225-240. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.07.013
13. Foroumadi, M., & Vaezi, A.R. (2016). Flow characteristics and rill erodibility in relation to the rainfall intensity in a Marl soil. *Iran-Watershed Management Science and Engineering 12*(40), 11-23. (In Persian with English abstract)
14. Foroumadi, M., & Vaezi, A.R. (2017). Physical degradation and particle detachment capacity of rill in relation to rainfall intensity and raindrop impact in a Marl soil. *JWSS-Isfahan University of Technology, 21*(2), 263-277. (In Persian with English abstract)
15. Foroumadi, M., & Vaezi, A.R. (2018). Investigating temporal variation of rill erosion in an erosion-susceptible soil under different rainfall intensities. *Applied Soil Research*, *7*(2), 135-147. (In Persian with English abstract)
16. Francos, M., Pereira, P., Alcañiz, M., Mataix-Solera, J., & Úbeda, X. (2016). Impact of an intense rainfall event on soil properties following a wildfire in a Mediterranean environment (North-East Spain). *Global* and *Planetary Change*, *145*, 11–16.
17. Fu, Y., Li, G.L., Zheng, T.H., Li, B.Q., & Zhang, T. (2017). Splash detachment and transport of loess aggregate fragments by raindrop action. *Catena*, *150*, 154-160. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.021
18. Guy, B.T., Dickinson, W.T., & Rudra, R.P. (1987). The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow. *Transactions of the ASAE*, *30*(5), 1378-1386.
19. Han, Y., Fan, Y., Xin, Z., Wang, L., Cai, Q., & Wang, X. (2016). Effects of wetting rate and simulated rain duration on soil crust formation of red loam. *Environmental Earth Sciences*, *75*(2), 140-149.
20. He, J.J., Li, X., Jia, L.J., Gong, H.L., & Cai, Q.G. (2014). Experimental study of rill evolution processes and relationships between runoff and erosion on clay loam and loess. *Soil Science Society of America Journal, 78*(5), 1716-1725. https://doi.org/10.2136/sssaj2014.02.0063
21. He, J.J., Sun, L.Y., Gong, H.L., Cai, Q.G., & Jia, L.J. (2016). The characteristics of rill development and their effects on runoff and sediment yield under different slope gradients. *Journal of Mountain Science*, *13*(3), 397-404.
22. Huo, Y.Y., Wu, S.F., Feng, H., & Yuan, L.F. (2011). Dynamic process of slope rill erosion based on three-dimensional laser scanner. *Science of Soil and Water Conservation, 9*, 32–37.
23. Jin, K., Cornelis, W.M., Gabriels, D., Baert, M., Wu, H.J., Schiettecatte, W., Cai, D.X., De Neve, S., Jin, J.Y., Hartmann, R., & Hofman, G. (2009). Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses. *Catena*, *78*(1), 81-86.
24. Kimaro, D.N., Poesen, J., Msanya, B.M., & Deckers, J.A. (2008). Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: interrill and rill erosion. *Catena*, *75*, 38-44.
25. Kinnel, P.I.A. (2003). Event erosivity factor and errors in erosion predictions by some empirical models. *Ausrtalian Journal of Soil Research*, *211*, 991-1003.
26. Li, J., Cai, Q.G., & Sun, L.Y. (2010). Reviewing on factors and threshold conditions of rill erosion. *Progress in*

Geography, *29*(11), 1319-1325.
27. Lu, J., Zheng, F., Li, G., Bian, F., & An, J. (2016). The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China. *Soil and Tillage Research, 161*, 79-85. https://doi.org/10.1016/j.still.2016.04.002
28. Ma, R.M., Li, Z.X., Cai, C.F., & Wang, J.G. (2014). The dynamic response of splash erosion to aggregate mechanical breakdown through rainfall simulation events in Ultisols (subtropical China). *Catena*, *121*, 279-287.
29. Mc Kenzie, N., Coughlan, K., & Cresswell, H. (2002). *Soil physical measurement and interpretation for land evaluation* (Vol. 5). Csiro Publishing.
30. Meshesha, D.T., Tsunekawa, A., Tsubo, M., Haregeweyn, N., & Tegegne, F. (2016). Evaluation of kinetic energy and erosivity potential of simulated rainfall using laser precipitation monitor. *Catena*, *137*, 237–243. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.09.017
31. Momm, H.G., Wells, R.R., & Bennett, S.J. (2018). Disaggregating soil erosion processes within an evolving experimental landscape. *Earth Surface Processes and Landforms*, *43*(2), 543-552.
32. Moussouni, A., Mouzai, L., & Bouhadef, M. (2014). The effect of raindrop Kinetic energy on soil erodibility. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, *8*(12), 879-883.
33. Qin, C., Zheng, F., Wilson, G.V., Zhang, X.J., & Xu, X. (2019). Apportioning contributions of individual rill erosion processes and their interactions on loessial hillslopes. *Catena*, *181*, 104099.
34. Qin, C., Zheng, F., Xu, X., Wu, H., & Shen, H. (2018). A laboratory study on rill network development and morphological characteristics on loessial hillslope. *Journal of Soils and Sediments*, *18*(4): 1679-1690.
35. Rouhipour, H., Farzaneh, H., & Asadi, H. (2004). The effect of aggregate stability indices on soil erodibility factors using rainfall simulator. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, *11*(3): 235-254. (In Persian)
36. Shen, H.O., Zheng, F.L., Wang, L., & Wen, L.L. (2019). Effects of rainfall intensity and topography on rill development and rill characteristics on loessial hillslopes in China. *Journal of Mountain Science*, *16*(10): 2299-2307.
37. Tailong, G., Quanjiu, W.D., & Li, J.Z. (2010). Effect of surface stone cover on sediment and solute transport on the slope of fallow land in the semi-arid region of northwestern China. *Soils and Sediment*, *10*, 1200-1208.
38. Vaezi, A.R., Ahmadi, M., & Cerdà, A. (2017). Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls .*Science of the Total Environment*, *583*, 382-392.
39. Vaezi, A.R., Akbari, S., & Mohammadi, M.H. (2014). Study of rainfall processes in calcareous soils aggregates under laboratory conditions in NW Zanjan, Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *45*(1), 87-94. (In Persian)
40. Vaezi, A.R., & Besharat, F. (2015). Rainfall during events on runoff and soil loss under simulated rainfalls. *Jwmseir*, *9*(29), 9-18. (In Persian)
41. Vaezi, A.R., & Heidari, M. (2019). Investigating the effect of wheat straw on soil loss by rill erosion in furrows in different growth stages of rainfed wheat. *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*, *33*(2), 127-139. (In Persian with English abstract)
42. Vaezi, A.R., & Vatani, A. (2014). Determination of rill erodibility in some Zanjan soils under rain simulated. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, *71*, 59-67. (In Persian)
43. Vaezi, A.R., & Vatani, A. (2015). Determining rill erodibility in some soils in Zanjan province under simulated rainfall. *JWSS-Isfahan University of Technology*, *19*(71), 59-68. (In Persian). https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.71.59
44. Valette, G., Prévost, S., Lucas, L., & Léonard, J. (2006). SoDA project: A simulation of soil surface degradation by rainfall. *Computers and Graphics*, *30*(4), 494-506.
45. Vrieling, A. (2006). Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. *Catena*, *65*(1), 2-18.
46. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, *37*(1), 29-38.
47. Wei, W., Chen, L., Fu, B., Huang, Z., Wu, D., & Gui, L. (2007). The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. *Journal of hydrology*, *335*(3-4), 247-258.
48. Wirtz, S., Seeger, M., & Ries, J.B. (2012). Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena*, *91*, 21-34.
49. Wu, H., Xu, X., Zheng, F., Qin, C., & He, X. (2018). Gully morphological characteristics in the loess hilly-gully region based on 3D laser scanning technique. *Earth Surface Processes and Landforms*, *43*(8), 1701-1710.
50. Yoder, R.E. (1936). A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses 1. *Agronomy Journal*, *28*(5), 337-351.
51. Zarif, M.S., Sadeghi, S.H.R., & Mirnia, S.KH. (2009). *Study on changes in runoff and sediment yield in two difference slope in Kojour forest watershed.* Fifth National Conference on Watershed Management Science and Engineering of Iran. Gorgan. 2-3 May, page 2. (In Persian)
52. Zhang, X.C., & Wang, Z.L. (2017). Interrill soil erosion processes on steep slopes. *Journal of Hydrology, 548*, 652–664. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.046
53. Zhao, L., Hou, R., & Wu, F. (2018). Effect of tillage on soil erosion before and after rill development. *Land*

Degradation and Development, *29*(8), 2506-2513. https://doi.org/10.1002/ldr.2996